

文章编号 1002-0268 (2006) 08-0067-05

SGC 设计与马歇尔设计方法设计 SMA 最佳沥青用量的比较研究

游宏¹, 黄卫东², 陈乐生³, 胡全章⁴

1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 四川省交通厅, 四川 成都 610041; 4. 西安方舟工程咨询有限公司, 陕西 西安 710064

摘要: 分别对细、中、粗 3 种不同的 SMA 级配, 采用 SGC 设计与马歇尔设计方法, 设计出 SMA 最佳沥青用量, 进行了研究比较, 结果表明: SGC 设计方法确定的 SMA 最佳沥青用量比马歇尔设计方法确定的最佳沥青用量有大幅度减少, 其原因在于当采用 SGC 旋转 100 次成型混合料试件时, 其压实功显著大于马歇尔双面击实 50 次成型的混合料试件, 而我国目前的施工条件在路面难以达到相应的压实条件, 易出现空隙率偏大的问题, 因此建议在我国采用 SGC 进行 SMA 混合料设计时, 对美国的规范进行修改, 降低旋转压实的次数以适应我国的施工条件。

关键词: 混合料设计方法; SMA; 旋转压实仪; 最佳沥青用量; 级配

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Comparison Research on SGC and Marshall Mixture Design Procedure for SMA

YOU Hong¹, HUANG Wei-dong², CHEN Le-sheng³, HU Quan-zhang⁴

(1. Changsha University of Science and Technology, Hunan Changsha 410076, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Communications of Sichuan Province, Sichuan Chengdu 610041, China;

4. Xi'an Fangzhou Engineering Consulting Limited Company, Shaanxi Xi'an 710064, China)

Abstract: The authors present comparative study of conventional mixture design procedure for SMA Marshall design procedure and the mixture design procedure with superpave gyratory compactor (SGC) used to compacted the mixture with three different SMA gradations. It is quite different when the SGC mixture design procedure is used to design the SMA mixture. The three different SMA gradations were used to design OAC (optimum asphalt content) by the SGC and Marshall mixture design procedure respectively. It is found that the OAC determined by the SGC design procedure is remarkably decreased compared to that by Marshall design when the number of gyrations is 100. It is recommended that the number of gyrations should be decreased instead of 100 when SGC is used to design SMA mixture in China.

Key words: mixture design procedure; SMA; SGC; OAC; gradation

由于 SMA 路面的抗滑、不渗水、耐久及良好的高温稳定性, 成为目前国内路面尤其是高等级路面的主要选择。国内在进行 SMA 混合料设计时, 基本是以马歇尔设计方法进行混合料设计的, 由于马歇

尔成型压实功偏小, 用马歇尔设计方法来设计 SMA 这样的骨架结构时, 为防止将骨料击碎, 要求只击实 50 次, 进一步降低了压实功, 易于造成设计的混合料沥青用量偏高, 而 SMA 沥青用量本身就比较

收稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50308021)

作者简介: 游宏 (1967-), 男, 四川成都人, 高级工程师, 研究方向路面工程. (youhong67@sina.com)

大,因此马歇尔设计方法设计的最佳沥青用量用于上面层易于出现车辙与泛油这两大问题。

在美国最早于 1999 年提出了根据旋转压实仪 (SGC) 设计 SMA 混合料的标准规范与方法。旋转压实仪由于更能模拟路面的现场压实,有更大的压实功,相应设计的沥青混合料更适用于大交通量的路面,因此在进行大交通量路面混合料设计时,用旋转压实仪 (SGC) 进行沥青混合料设计具有自身的优势。

为此本文选用了 SMA 常用的细、中、粗 3 种级配,根据美国的 SMA 混合料的标准规范与方法^[1,2],与我国的《公路沥青路面施工技术规范》^[3] 分别用 SGC 与马歇尔设计方法确定了各自的最佳沥青用量,并对两种设计方法导致沥青用量不同的原因及相应的问题进行了分析与比较。

由于《公路沥青路面施工技术规范》^[3] 中关于混合料最大理论密度等所用符号与美国规范有很大不同,为此本文为便于比较,一律采用美国规范的符号与表示方式。

1 两种设计方法技术要求比较

两种设计方法技术要求的比较如表 1 所示。

从表 1 可以看出,美国旋转压实设计方法与我国的马歇尔设计方法在设计 SMA 时有很大的不同,旋转压实设计方法更多的与 Superpave 设计方法相似,而马歇尔 SMA 设计方法则与马歇尔 HMA 设计

方法相似。

表 1 SMA 设计时的技术要求
Tab.1 Specification requirement for
designing Stone Matrix Asphalt

技术要求	美国旋转压实设计方法	马歇尔设计方法
试件成型	旋转压实仪旋转 压实成型 100 次	两面击实 50 次
试件尺寸	约 4 700 g 混合料, Φ150 mm×110 mm	Φ101.6 mm×63.5 mm
空隙率/%	4.0	3~4
VMA/%	>17	>17
	VCA _{MX} <VCA _{DRC}	VCA _{MX} <VCA _{DRC}
TSR/%	>70	
析漏损失/%	<0.3	<0.2 或 0.1
沥青用量/%	>6.0	
VFA	/	75~85
稳定度/kN		>5.5 或 6.0
流值/mm		2~5
肯塔堡飞散试验的损失/%		<20 或 15

2 试验方案：材料、级配与沥青用量

本研究所用的沥青为埃索 70 号沥青,密度为 1.02 g/cm³。纤维为木质纤维素 (产于德国),密度为 1.4 g/cm³。以矿料重量的 0.3%(即纤维石料比)加入。矿料将各档料洗后分档筛,0.075 以下全部采用矿粉,所用各档石料密度如表 2 所示。

表 2 各档石料密度
Tab.2 Gravity of aggregate

筛孔尺寸/mm	13	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
表观密度/(g·cm ³)	2.755	2.762	2.759	2.719	2.669	2.657	2.667	2.718	2.666	2.709
毛体积密度/(g·cm ³)	2.717	2.715	2.701	2.668	2.669	2.657	2.667	2.718	2.666	2.709

注：2.36 mm 以下细矿料未测毛体积密度,均以表观密度代替。

本研究以 SMA-13(12.5)作为典型级配进行研究,采用 3 个级配,即 4.75 的通过率分别采用 25%、30%、34%,理由如下：根据美国的调查,工程上级配采用 4.75 的通过率为 25%~30%是最多的,采用 4.75 的通过率为 30%~35%与 20%~25%的级配是一样多的。在我国目前 SMA 沥青用量普遍偏低、矿料质量无法保障、压实不足的情况下,过粗的级配容易引起实际工程的空隙率过大,在工程上有较大的风险;因此,3 种级配分别采用 4.75 的通过率 25%、30%、34%,以尽量涵盖工程上可能采用的级配。0.075 以下的用量,美国规范限制其上限为 11%,但国外多数国家、美国的很多州及我国均将上限定为

12%甚至 13%,考虑到目前国外对粉胶比的限制有放宽的趋势,因此本研究将矿粉的上限定在了 12%。最终确定了 3 个级配如表 3 所示。

表 3 SMA 的细、中、粗 3 个级配
Tab.3 Three SMA gradations for fine, middle, coarse

筛孔尺寸	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配 1 (细)	100	100	78	34	29	27	23	20	18	12
级配 2 (中)	100	98	73	30	24	22	18	14	13	12
级配 3 (粗)	100	94	61.5	25	19.5	18	15	13	12	11

一般情况下,当 4.75 的通过率超过 30%时,如果采用 $VMA=100-\left[\frac{G_{mb} \sum P_s}{G_{sb}}\right]$ 计算,而不是国内以前

常用的空隙率加沥青体积,则 VMA 会小于 17%。本文主要讨论两种设计方法下的最佳沥青用量的比较,主要集中于空隙率的讨论与研究。关于 SMA 中的 VMA,笔者将在后续的文章中对此进行详细讨论;另外关于 SGC 设计下的 SMA 中的 VCA 也将有专门文章讨论,在此也不进行讨论。

每种级配采用 3 个不同的油石比,如表 4 所示。

表 4 SMA 在 3 个级配下的不同油石比

Tab.4 Different asphalt content for three SMA gradations

编号	A	B	C
级配 1 (细) /%	6.3	5.9	5.5
级配 2 (中) /%	6.8	6.2	5.8
级配 3 (粗) /%	6.7	6.2	5.8

3 试验结果

根据表 2、表 3 的结果,可以计算出 3 个级配的矿料表观密度与毛体积密度。

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}, \quad (1)$$

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}, \quad (2)$$

式中, G_{sa} 为矿料混合料的表观密度; G_{sb} 为矿料混合料的毛体积密度; P_1, P_2 为各档矿料的筛余率; G_1, G_2 为各档矿料的相应的表观密度或毛体积密度。

矿料的有效密度采用美国 Superpave 设计方法中的公式来计算,即 C 采用 0.8,公式如下,

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 (G_{sa} - G_{sb}), \quad (3)$$

式中, G_{se} 为矿料混合料的有效密度。

则 3 个级配的矿料表观密度、毛体积密度、有效密度如表 5 所示。

表 5 各级配矿料的密度

Tab.5 G_{sa}, G_{sb} and G_{se} for different gradation

级配	级配 1 (细)	级配 2 (中)	级配 3 (粗)
矿料表观密度 $G_{sa}/(g \cdot cm^3)$	2.736	2.740	2.744
矿料毛体积密度 $G_{sb}/(g \cdot cm^3)$	2.698	2.700	2.703
矿料有效密度 $G_{se}/(g \cdot cm^3)$	2.729	2.732	2.735

在得出矿料的有效密度后,根据油石比、纤维占矿料的比例 (0.3%) 及沥青与纤维的密度,可以计算出混合料最大理论密度 G_{mm} ,

$$G_{mm} = \frac{100 + P_b + P_x}{\frac{100}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b} + \frac{P_x}{G_x}}, \quad (4)$$

式中, G_{mm} 为混合料最大理论密度, g/cm^3 ; P_b 为沥青混合料油石比, %; G_b 为沥青表观密度, g/cm^3 ; P_x 为纤维与矿料的比例, 本文所用均为 0.3%; G_x 为纤维密度, 本文为 $1.4 g/cm^3$ 。

根据式 (4), 相应计算出级配 1 的 3 个油石比的混合料最大理论密度 G_{mm} , 见表 6; 级配 2、级配 3 在 3 个油石比的混合料最大理论密度 G_{mm} 分别见表 7、表 8。

根据 SGC 成型 SMA 的方法, 对级配 1 的 3 个沥青用量, 每个沥青用量用旋转压实仪在 $145^\circ C$ 左右压实 100 次, 成型两个试件, 然后采用表干法测出每个混合料试件的毛体积密度 G_{mb} 。相应地根据我国规范要求, 用马歇尔击实仪两面击实 50 次成型的马歇尔试件, 并同样采用表干法测出每个混合料试件的毛体积密度 G_{mb} , 见表 6。

根据混合料试件的毛体积密度与最大理论密度, 可以采用公式 (5) 计算混合料的空隙率。

$$V_a = (1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}) \times 100 \quad (5)$$

相应计算出级配 1 旋转压实成型与马歇尔成型下各沥青用量时混合料的空隙率, 根据油石比与空隙率的变化规律, 大致估算出空隙率为 4% 时的相应最佳油石比, 具体结果见表 6。

表 6 级配 1 在两种成型方法下的体积参数

Tab.6 Volume property of gradation 1 for two compaction method

成型方式	油石比/%	G_{mm}	G_{mb}	V_a
估算的 SGC 成型	6.30	2.477	2.461	0.6
的最佳油石比:	5.90	2.490	2.459	1.2
约为 4.8%	5.50	2.504	2.454	2.0
	6.30	2.477	2.426	2.1
估算的马歇尔成型	5.90	2.490	2.422	2.7
的最佳油石比 5.5%	5.50	2.504	2.400	4.1

从表 6 结果可以看出, 用 SGC 压实成型时, 级配 1 在 5.5% 油石比时空隙率只有 2%, 因此在 4% 空隙率时对应的最佳油石比只能进行估算; 观察马歇尔设计法中的沥青用量对空隙率的影响, 空隙率从 2.1% 增加到 4.1% 时, 沥青用量减少了 0.8%; 粗略估算 SGC 设计下的级配 1 当空隙率从 2% 增加到 4% 时, 油石比将比 5.5% 低约 0.7% 左右, 即最佳油石比可能约 4.8%。因此对于较细的 SMA 级配 1, 用 SGC 设计方法确定的最佳油石比比马歇尔方法确定的最佳油石比至少少 0.7% 的沥青用量。

对级配 2 的 3 个沥青用量, 同样每个沥青用量

用旋转压实仪在 145 °C左右压实 100 次成型 2 个试件, 然后采用表干法测出每个混合料试件的毛体积密度 G_{mb} ; 相应地用马歇尔击实仪两面击实 50 次成型马歇尔试件, 同样用表干法测出每个混合料试件的毛体积密度 G_{mb} 。结果见表 7。

并计算出级配 2 旋转压实成型与马歇尔成型下各沥青用量时混合料的空隙率, 根据油石比与空隙率的变化规律, 大致估算出空隙率为 4% 时的相应最佳油石比, 具体结果见表 7。

表 7 级配 2 在两种成型方法下的体积参数

Tab.7 Volume property of gradation 2 for two compaction method

成型方式	油石比/%	G_{mm}	G_{mb}	V_a
估算的 SGC 成	6.80	2.463	2.438	1.0
型的最佳油石	6.20	2.483	2.434	2.0
比 $\leq 5.5\%$	5.80	2.496	2.437	2.4
估算的马歇尔成	6.80	2.463	2.391	2.9
型的最佳油石	6.20	2.483	2.380	4.1
比 $\leq 6.2\%$	5.80	2.496	2.379	4.7

从表 7 结果可以看出, 对于不粗不细的 SMA 级配 2, 用 SGC 设计方法确定的最佳油石比比马歇尔方法确定的最佳油石比至少少 0.7% 的沥青用量。

对级配 3 的 3 个沥青用量, 在两种成型方法下的各参数如表 8 所示。

表 8 级配 3 在两种成型方法下的体积参数

Tab.8 Volume property of gradation 8 for two compaction method

成型方式	油石比/%	G_{mm}	G_{mb}	V_a
估算的 SGC 成型	6.70	2.469	2.401	2.7
的最佳油石比 $\leq 5.8\%$	6.20	2.485	2.404	3.3
	5.80	2.499	2.402	3.9
估算的马歇尔成型	6.70	2.469	2.399	2.8
的最佳油石比 $\leq 6.5\%$	6.20	2.485	2.374	4.5
	5.80	2.499	2.382	4.7

从表 8 结果可以看出, 对于较粗的 SMA 级配 3, 用 SGC 设计方法确定的最佳油石比比马歇尔方法确定的最佳油石比少 0.7% 的沥青用量。

4 分析与讨论

采用本研究所用的矿料, 对细、中、粗 3 种不同的 SMA 级配, SGC 设计方法确定的最佳油石比(或最佳沥青用量)比马歇尔设计方法确定的最佳油石比(或最佳沥青用量)有大幅度减少, 约为 0.7%。

沥青混合料空隙率只由 2 个参数决定: 混合料最大理论密度与毛体积密度。当级配相同及油石比相同时, 混合料最大理论密度是不随外界条件变化的。而混合料的毛体积密度在级配与油石比确定的

条件下, 会随成型试件压实功的不同而变化, 压实功越大, 混合料越致密, 其毛体积密度越大, 相应其混合料的空隙率就越小, 达到 4% 空隙率时所用的沥青就越少。对表 6~表 8 数据进行分析可以看出, 两种设计方法下的相应的混合料最大理论密度均相同, 而毛体积密度却有较大不同, SGC 旋转压实 100 次成型的试件的毛体积密度均明显大于马歇尔双面击实 50 次所成型的混合料试件。由此发现, SGC 设计方法确定的 SMA 最佳油石比比马歇尔设计方法确定的最佳油石比小。两种设计方法最大的不同在于压实方式的不同导致的压实功不同, 进而导致在相同级配下达到相同空隙率时所用的最佳沥青用量不同。

从国内使用经验来看, 很多 SMA 工程均有降低马歇尔设计沥青用量的情况, 即实验室用马歇尔方法设计出最佳沥青用量超过 6% 后, 在具体工程使用时却将沥青用量降到 6% 以下甚至更低的情况。出现这一现象的原因是多方面的, 马歇尔双面击实 50 次所对应的压实功不足也是一个原因。对于 AC 或 Superpave 这样的密级配, SGC 旋转压实 100 次的压实功大于马歇尔双击击实 75 次的压实功, 这在国内外已经得到确认。用马歇尔成型 SMA 的骨架结构时, 为防止将骨料击碎, 采用击实 50 次; 而 SGC 旋转压实时产生的揉搓作用会导致骨料之间的重新定位, 从而产生更好的压实效果, 一增一减造成 SGC 旋转压实 100 次的压实功远大于马歇尔双面击实 50 次的压实功, 从而使 SGC 设计方法确定的 SMA 最佳沥青用量比马歇尔设计方法确定的最佳沥青用量有大幅度减少。

在马歇尔双面击实 50 次存在压实功不足的情况下, 美国规范 AASHTO Designation: MP8-02 规定的 SGC 旋转压实 100 次对于我国可能也存在压实功过大的问题。首先, 我国的很多 SMA 工程出现现场空隙率过大的现象, 为此提出了各种增加现场压实功措施以降低空隙率, 但仍经常出现现场空隙率偏大的问题; 其次, 在同样达到 $VMA > 17$ 的要求下, 较大的实验室压实功设计出的 SMA 的级配将更粗, 即 SGC 旋转压实 100 次设计的 SMA 级配会明显比马歇尔双面击实 50 次设计的级配粗, 在相同沥青用量下的不同 SMA 级配, 较粗的 SMA 级配必然要求更大的压实功才能达到相同的空隙率; 最后, 根据我国使用 SGC 设计 Superpave 级配的经验可知, 用 SGC 设计方法也会出现现有压实功不足的问题。因为, 在 SMA 路面混合料压实时, 主要产生揉搓作用的轮

胎压路机一般并未采用,即骨料的重新定位程度并不如 SGC 旋转压实 100 次的程度。因此,建议在采用 SGC 进行 SMA 混合料设计时,对美国的规范进行修改,降低旋转压实的次数以适应我国的施工条件;或者改变现有的施工压实工艺,尝试采用胶轮压路机进行碾压。

5 结论

(1) 当 SMA 级配相同的条件下,SGC 设计方法确定的 SMA 最佳油石比(或最佳沥青用量)比马歇尔设计方法确定的最佳油石比(或最佳沥青用量)有大幅度减少,采用本研究所用的矿料,对细、中、粗 3 种不同的 SMA 级配,最佳油石比减少约为 0.7%。

(2) SGC 设计方法确定的最佳沥青用量比马歇尔设计方法确定的最佳沥青用量少的原因在于:当采用 SGC 旋转 100 次成型混合料试件时,其压实功明显大于马歇尔双面击实 50 次成型的混合料试件,导致 SGC 成型的混合料的毛体积密度明显大于马歇尔成型的混合料毛体积密度,相应其空隙率较马歇尔成型空隙率小。

(3) SGC 旋转压实 100 次的压实功较大,目前,

我国的施工条件下可能在路面上难以达到相应的压实条件,易出现空隙率偏大的问题,建议在采用 SGC 进行 SMA 混合料设计时,对美国的规范进行修改,降低旋转压实的次数以适应我国的施工条件。

参考文献:

- [1] AASHTO MP 8. 2001, Standard Specification for: Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)[S].
- [2] AASHTO Designation: PP41 - 02, Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)[S].
- [3] JTG F40- 2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [4] BROWN E R, RAJIB B MALLICK. Stone Matrix Asphalt Properties Related to Mixture Design [R]. Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 1994.
- [5] BROWN E R, RAJIB B MALLICK, JOHN E HADDOCK, JOHN BUKOWSKI. Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States [A]. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists[C]. 1997.
- [6] STUART K D. Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixture Design[R]. Report No. FHWA- RD- 92-006, 1992.
- [7] 谭忆秋. 用体积法设计 SMA 混合料的配合比[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(3): 105- 110.
- [8] 余叔藩. SMA 路面在欧洲的实践(下)[J]. 国外公路, 2000, 20(2): 9- 12.

(上接第 66 页)

形预测模型,并以实例验证了模型的有效性。

(4) 路面平整度 IRI 值变化的数学定量分析与路基地质等因素定性分析相结合,不仅验证了数学理论用于实际工程的正确性,而且使定性分析有了理论依据。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 王晖光, 陆键. 基于三弯矩样条函数插值模型的非等距时序灰

色预测方法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(6): 53- 55.

- [3] 王晖光, 陆键. 国际平整度指数 IRI 二元曲面函数描述模型的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23 (7).
- [4] 尹晖. 灰色动态预测方法及其在变形预测中的应用 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(1).
- [5] 何勇, 等. 随机型时间序列预测方法的研究[J]. 系统工程理论与实践, 1997 (1).
- [6] 潘玉利. 路面管理系统原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [7] 姚祖康. 路面管理系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [8] 王新洲, 等. 模糊空间信息处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.